

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ / METHODS AND DEVICES FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS OF MATERIALS, PRODUCTS, SUBSTANCES AND THE NATURAL ENVIRONMENT

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56>

ВЛИЯНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ И ДИСПЕРСНО-КОЛЛОИДНОГО РАССЕЯНИЯ НА СПЕКТРЫ ВИДИМОГО ДИАПАЗОНА ТРАНСФОРМАТОРНЫХ МАСЕЛ

Научная статья

Козлов В.К.¹, Валиуллина Д.М.², Гиниатуллин Р.А.³, Минегалиев И.М.^{4,*}

⁴ORCID : 0009-0008-7733-1429;

^{1,2,4}Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

³Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (minegaliev.1998[at]mail.ru)

Аннотация

В статье представлены результаты комплексного исследования спектральных характеристик трансформаторных масел (ТМ), полученных в видимой области спектра. Проведён детальный анализ спектров пропускания для трансформаторных масел разных марок, а также спектров излучения свежих масел. Особое внимание уделено изучению спектров люминесценции ТМ с различными значениями тангенса угла диэлектрических потерь и спектрам свечения ТМ при различном уровне кислотного числа. На основе анализа данных установлено влияние молекулярного поглощения и рассеяния света дисперсно-коллоидными частицами на формирование спектров в видимом диапазоне трансформаторного масла. Также выявлена корреляция между полученными спектрами и электрическими параметрами исследуемых масел.

Ключевые слова: трансформаторное масло, молекулярное поглощение, дисперсно-коллоидное рассеяние, ароматические соединения.

INFLUENCE OF MOLECULAR ABSORPTION AND DISPERSE-COLLOIDAL SCATTERING ON THE VISIBLE RANGE SPECTRA OF TRANSFORMER OILS

Research article

Kozlov V.K.¹, Valiullina D.M.², Giniatullin R.A.³, Minegaliev I.M.^{4,*}

⁴ORCID : 0009-0008-7733-1429;

^{1,2,4}Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russian Federation

³Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

* Corresponding author (minegaliev.1998[at]mail.ru)

Abstract

The article presents the results of a comprehensive study of the spectral characteristics of transformer oils (TO) obtained in the visible region of the spectrum. A detailed analysis of transmission spectra for transformer oils of different brands, as well as emission spectra of fresh oils, has been carried out. Special attention is paid to the study of luminescence spectra of TO with different values of the dissipation factor and luminescence spectra of TO at different levels of acid number. On the basis of data analysis, the influence of molecular absorption and light scattering by disperse colloidal particles on the formation of spectra in the visible range of transformer oil was established. The correlation between the obtained spectra and electrical parameters of the investigated oils was also identified.

Keywords: transformer oil, molecular absorption, disperse-colloidal scattering, aromatic compounds.

Введение

В настоящее время в России больше половины эксплуатируемого парка силовых трансформаторов работают с превышением назначенного ресурса. Анализ причин отказов показывает, что их значительное количество обусловлено эксплуатацией оборудования со сроком службы более 25 лет. В данных условиях возрастает роль, как технической диагностики энергетического оборудования, так и проведение превентивных мер при осуществлении технического обслуживания. Работоспособность маслonaполненного силового оборудования напрямую зависит от состояния жидкого диэлектрика. В связи с этим необходима своевременная диагностика состояния трансформаторного масла [1], [2], [3].

Трансформаторное масло (ТМ) является продуктом нефтепереработки и имеет сложный химический состав, который напрямую зависит от способа получения и глубины очистки. Состав и свойства ТМ изучаются большим количеством физических и химических методов. Этому вопросу посвящено множество книг и статей [4], [6], [8], [10]. Однако актуальность данной темы далеко не исчерпана, т.к. на сегодняшний день нет полного понимания процессов, происходящих в масле при эксплуатации высоковольтных силовых трансформаторов, что необходимо для обеспечения надежной работы, как самих трансформаторов, так и всей энергосистемы в целом [11], [14], [17], [20].

Электрические характеристики ТМ в значительной мере зависят от молекулярного состава масла, от природы и размеров образующихся частиц.

Целью работы является установление вклада в спектры видимого диапазона трансформаторного масла молекулярного поглощения и рассеяния дисперсно-коллоидными частицами и связи спектров с электрическими характеристиками масел.

В представленной работе приведены исследования в данном направлении и описано влияние молекулярного состава и дисперсно-коллоидных процессов на электрические характеристики ТМ с помощью их спектров в видимом диапазоне.

Экспериментальная часть

Для проведения экспериментальных исследований были отобраны образцы масла из работающего оборудования «Казанских электрических сетей» и в их химической лаборатории определены характеристики качества этих образцов. Состаренные образцы свежего ТМ ТКп получены путем периодического отбора проб из термостата в котором ТМ выдерживалось при температуре 85 ± 3 °С в течение нескольких недель при открытом доступе воздуха в присутствии листов стали и меди в соотношении $0,1 \text{ см}^2$ поверхности на 1 г масла. Спектры пропускания ТМ записаны при комнатной температуре в кварцевых кюветах толщиной 50 мм на спектрометре СФ-56.

Спектры свечения масел регистрировались с помощью малогабаритного спектрометра Avantes с оптоволоконным кабелем.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены спектры пропускания различных свежих трансформаторных масел.

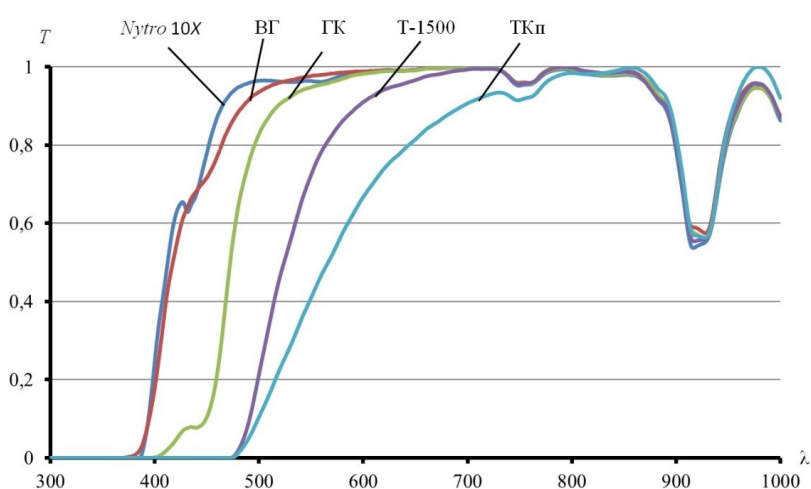


Рисунок 1 - Спектры пропускания трансформаторных масел

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.1>

Примечание: толщина оптического слоя 50 мм

Минеральное трансформаторное масло представляет собой очищенную нефтяную фракцию с температурой кипения в диапазоне 300-400 °С, которая разделяется на три основные структурные группы: парафиновые, нафтеновые и ароматические с числом атомов углерода не более 26 и отсутствием твердых частиц.

Парафиновые углеводороды поглощают в области спектра короче 250 нм, нафтеновые в области спектра короче 300 нм и только ароматические соединения имеют поглощение в области спектра 300÷600 нм [21].

Как показано в [22], начало спектра поглощения молекул углеводорода тем больше смещено в длинноволновую область, чем больше конденсированных бензольных ядер содержит молекула. Эта зависимость четко проявляется у ряда молекул с линейным присоединением колец. При ангулярном расположении ядер такой однозначной зависимости не наблюдается. В ряду аценов бензол-нафталин-антрацен-нафтацен-пентацен-гексацен частоты переходов уменьшаются при добавлении бензольного кольца в среднем на 5000 см^{-1} и составляют соответственно 264 нм, 315 нм, 381 нм, 473 нм, 575 нм и 693 нм.

Для ряда орто-пери-конденсированных соединений таких как фенантрен, 1,2 бензантрацен, перилен, хризен частоты переходов меняются следующим образом 346 нм, 384 нм, 440 нм, 359 нм соответственно.

По показателю противокислительной стабильности трансформаторные масла существенно отличаются друг от друга и их можно условно разбить на три группы:

- I группа: масла марок ТКп, ТАп, ТСП;
- II группа: масла марок Т-1500, Т-750;
- III группа: масла марок ГК, ГБ, АГК.

Если принять индукционный период окисления масел I группы за 1, то для масел II группы он продолжительнее в 2-2,5 раза, а для масел III группы в 4-5 раз, т.е. при одинаковых условиях эксплуатации срок службы масел III группы

будет значительно больше, чем масел I группы. При этом содержание ароматических соединений в ряду масел ГК, Т-1500, ТКп возрастает от 1,6% у ГК до 10% у Т-1500 и до 18% у ТКп [11].

Таким образом, прослеживается зависимость стабильности масла против окисления от концентрации ароматических соединений в трансформаторном масле.

Спектры поглощения ароматических соединений смещаются в красную сторону при возрастании количества бензольных колец в молекуле, что и наблюдается в спектрах пропускания различных трансформаторных масел, т.е. в ряду масел ГК, Т-1500, ТКп возрастает как концентрация ароматических соединений в целом, так и концентрация соединений с большим числом бензольных колец.

Таким образом, в видимой области спектра ТМ поглощают лишь молекулы ароматических соединений и спектры пропускания свежих ТМ в видимой области спектра полностью обусловлены молекулярным поглощением ароматических соединений трансформаторного масла.

Существует два канала старения ТМ в процессе эксплуатации:

1. В процессе старения образование пероксидов, оксидов, продуктов глубокого окисления, асфальтенов приводит к формированию в ТМ неоднородных структур, которые со временем увеличиваются в размерах, агрегируют, агломерируют и коагулируют.

2. В процессе старения в ходе эксплуатации происходит увеличение доли ароматических углеводородов относительно содержания парафинов и нафтенов, молекулы с ароматическими группами в ТМ самоорганизуются в столбчатые «пачечные» надмолекулярные структуры за счет межмолекулярных взаимодействий, причем процесс осадкообразования в ТМ определяется главным образом не окисленными, а ароматическими соединениями.

Склонность к окислению основных составляющих трансформаторного масла растет в ряду: ароматические-парафиновые-нафтеновые [23]. Концентрация ароматических соединений в ТМ меняется от единиц до двух десятков процентов, в то время как концентрация окисленных молекул не более 0,02%.

На рис. 2 приведены спектры пропускания образцов ТМ ТКп в области 600-1100 нм при увеличении степени старения (степени окисления), полученных в термостате при длительном выдерживании ТМ при температуре 85 °С.

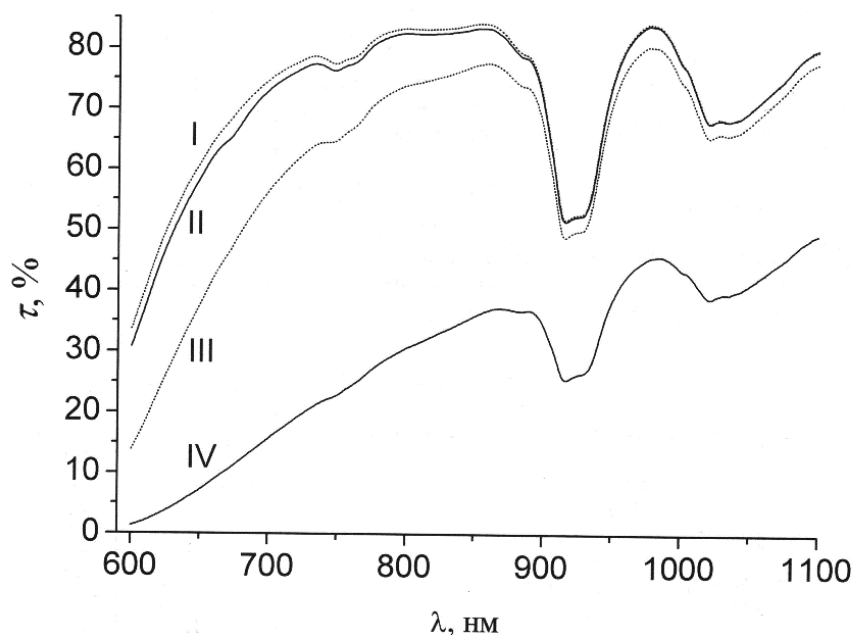


Рисунок 2 - Спектры пропускания масла ТКп с различными значениями кислотных чисел:

I - 0,032; II - 0,095; III - 0,199; IV - 0,229

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.2>

В случае состаренного масла спектры пропускания будут обусловлены молекулярным поглощением, а также рассеянием излучения на дисперсных частицах, возникающих в процессе старения ТМ.

Следует отметить, что молекулярное рассеяние света, всегда присутствующее в жидкостях, существенно слабее рассеяния на частицах и его практически невозможно наблюдать на фоне Релеевского рассеяния частицами [23].

Интенсивность света (I_p), рассеянного под прямым углом, описывается уравнением:

$$I_p = 24\pi^3 \cdot \left(\frac{n_2^2 - n_1^2}{n_2^2 + 2 \cdot n_1^2} \right)^2 \cdot \frac{vV^2}{\lambda^4} \cdot I_0$$

где v – концентрация частиц в единице объема системы; V – объем частицы; n_1 , n_2 – показатели преломления чистого ТМ и материала частиц, соответственно; I_0 – интенсивность падающего света и работает для дисперсных систем, в которых частицы не поглощают свет, не окрашены и имеют сферическую форму, не проводят электрический ток, малы по сравнению с λ падающего света (не более $0,1 \cdot \lambda$) и удалены друг от друга на достаточно большие расстояния.

В трансформаторном масле присутствуют разные частицы (с широким спектром размеров и формы). С увеличением размера частиц показатель степени λ снижается от 4 до 2. В системах, где размер частиц становится несколько больше длины волны (показатель достигает 2), рассеянный свет становится белым. Когда же размер частиц значительно превышает λ (показатель равен 0), светорассеяние переходит в отражение света, не зависящее от λ . Частицы проводящие электрический ток, относятся к поглощающим частицам и тем самым они не принимают участие в рассеянии света.

Из рис. 1 следует, что молекулярное поглощение ТМ при длинах волн больше 600 нм отсутствует, тем не менее в интервале длин волн больше 600 нм в состаренных ТМ согласно рис. 2 наблюдается ослабление, которое увеличивается с ростом окисленности ТМ. Для проведения анализа природы этого поглощения в интервале длин волн от 600 нм до 700 нм проведем аппроксимацию кривых на рис. 2 формулой

$$J = k \cdot \lambda^{-m},$$

где k – коэффициент, зависящий от свойств материала частиц, их количества, формы и размеров; m – показатель, зависящий только от размеров частиц.

В результате обработки спектров получаем следующие значения: для образца I $m=6,14$; для образца II $m=6,01$; для образца III $m=4,57$; для образца IV $m=1,22$.

С учетом вышеприведенной формулы для Релеевского рассеяния частицами и последующего анализа зависимости интенсивности рассеяния от показателя степени λ (длина волны) можно сделать однозначный вывод о природе спектров пропускания на рис. 2, которая в основном обусловлена рассеянием на частицах, размер которых увеличивается в процессе старения ТМ, что и наблюдается в эксперименте при наблюдении рассеяния в состаренном масле.

Подтверждением особенностей спектров пропускания ТМ обусловленных, как молекулярным поглощением и рассеянием излучения на коллоидных частицах может служить спектральная зависимость спектров люминесценции ТМ, т.к. только ароматические соединения входящие в состав масла, а также появляющиеся в нем в процессе старения обладают способностью сильно люминесцировать при облучении их светом в коротковолновом диапазоне длин волн видимого диапазона.

На рис. 3 приведены спектры люминесценции свежих масел, при облучении их источником света с длиной волны 400 нм полушириной линии возбуждения примерно 25 нм.

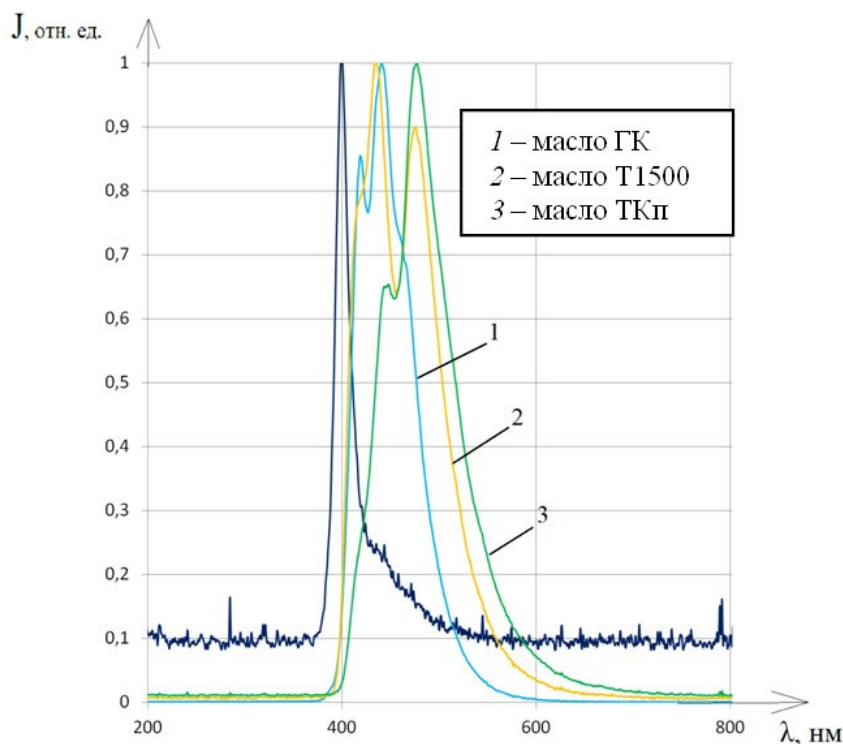


Рисунок 3 - Спектры излучения свежих масел, при облучении их источником синего света с длиной волны с максимумом 400 нм и полушириной линии примерно 25 нм

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.3>

Согласно [12], у масла ГК полосы в районе 420 нм, 440 нм и 460 нм принадлежат антрацену. В масле Т-1500 наряду с этими полосами появляется полоса в районе 475 нм принадлежащая нафтацену. Таким образом, в масле ГК в основном присутствует антрацен. У масла ТКп наблюдается люминесценция желтого цвета, согласно рис. 3 она обусловлена ароматическими соединениями сложного строения с количеством бензольных колец в молекуле больше четырех (нафтацен). Интенсивность люминесценции полосы в районе 540 нм у масла ТКп выше, чем у масла ГК, а у масла Т-1500 еще интенсивнее, что обусловлено возрастанием концентрации нафтацена в ряду масел ГК, ТКп, Т-1500. Интенсивность полосы в районе 570 нм возрастает в ряду масел ГК, Т-1500, ТКп, а значит и растет концентрация

пентацена в маслах от ГК до ТКп. Повышение концентрации пентацена приводит к изменению цвета люминесценции от зеленого у масла ГК к желтому у масла Т-1500 и темно-желтому у масла ТКп.

На рис. 4 приведена фотография масла в кювете размером 50 мм при облучении источником белого цвета с линией накачки на длине волны 447 нм. Облучение производилось с левой стороны кюветы.

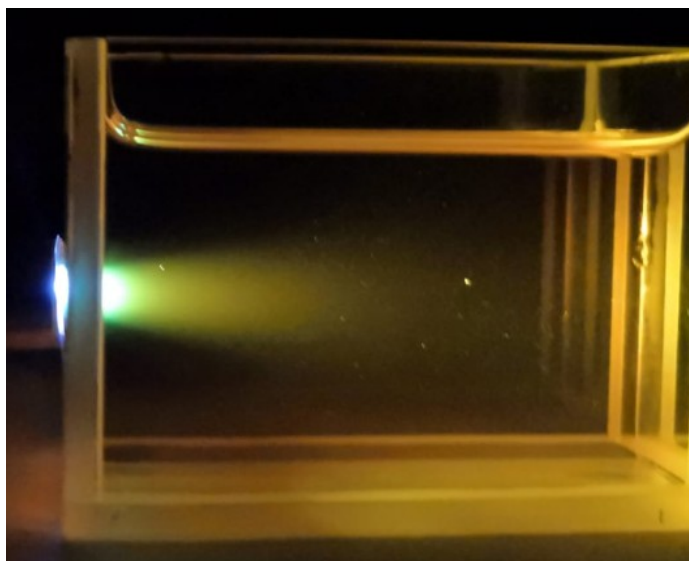


Рисунок 4 - Фотография кюветы для наблюдения масла
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.4>

При освещении ТМ излучением светодиода белого цвета, все излучение, попадающее в область молекулярного поглощения масла, поглощается в тонком пристеночном слое кюветы. Толщина этого слоя зависит от концентрации ароматических соединений в ТМ. Так как коэффициент поглощения у ароматических соединений большой на два порядка превосходит коэффициент поглощения нафтеннов и парафинов, толщина этого слоя составляет несколько мм и уменьшается с ростом концентрации ароматических соединений. В результате поглощения ароматические соединения начинают люминесцировать и тем самым создавать яркое пятно люминесценции в начале кюветы. Непоглощенная часть излучения источника освещения и свет люминесценции распространяются далее по кювете и его можно наблюдать только за счет рассеяния света на дисперсных частицах ТМ.

Таким образом, в начале кюветы наблюдается люминесценция масла, в середине кюветы рассеяние на дисперсных частицах масла, а на выходе, на экране наблюдается прошедшее излучение, усиленное люминесценцией масла ослабленное за счет рассеяния на дисперсных частицах ТМ, возникающих при его старении.

При старении ТМ меняется его молекулярный состав и возникают дисперсные частицы из продуктов старения. На рис. 5 приведены спектры люминесценции трансформаторных масел ГК с различными значениями тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg } \delta$) при $90^\circ \text{Св}\%$.

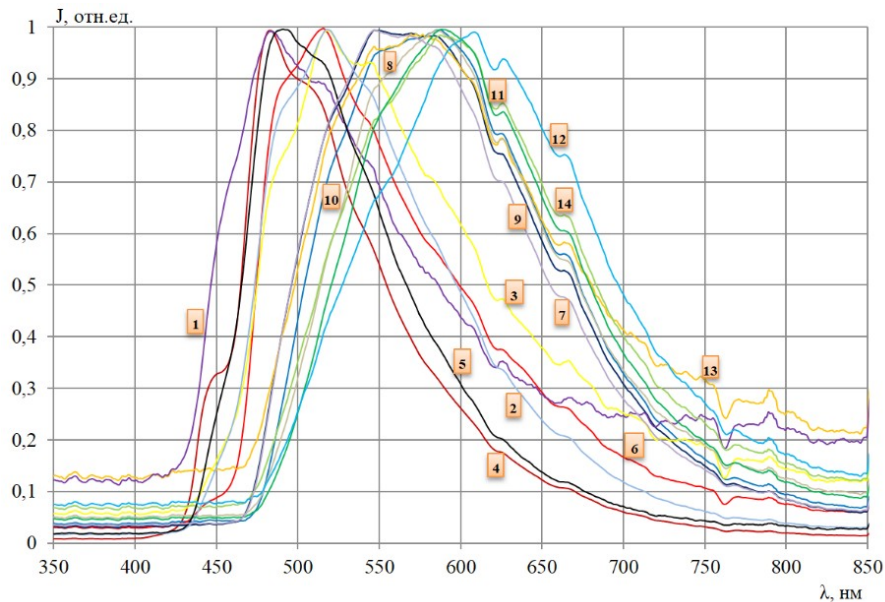


Рисунок 5 - Спектры люминесценции трансформаторных масел ГК с различными $\text{tg}\delta$ при 90°C в %
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.5>

На рис. 6 приведены спектры свечения образцов масел с разными значениями кислотного числа, зарегистрированные с области масла в середине кюветы.

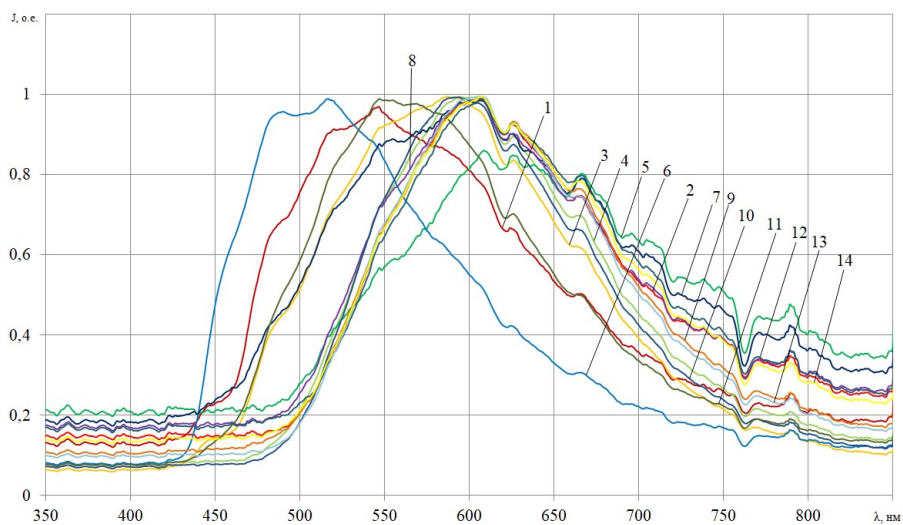


Рисунок 6 - Спектры свечения образцов масел с разными значениями КЧ, зарегистрированные с области масла в середине кюветы
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.6>

Основные физико-химические характеристики исследуемых образцов масел, приведенных на рис. 5 и 6 следующие: № 1 – $\text{KЧ}=0,045$, $\text{tg}\delta=3,09$; № 2 – $\text{KЧ}=0,093$, $\text{tg}\delta=6,99$; № 3 – $\text{KЧ}=0,046$, $\text{tg}\delta=4,63$; № 4 – $\text{KЧ}=0,089$, $\text{tg}\delta=6,09$; № 5 – $\text{KЧ}=0,099$, $\text{tg}\delta=8$; № 6 – $\text{KЧ}=0,023$, $\text{tg}\delta=2,15$; № 7 – $\text{KЧ}=0,058$, $\text{tg}\delta=3,03$; № 8 – $\text{KЧ}=0,085$, $\text{tg}\delta=6$; № 9 – $\text{KЧ}=0,093$, $\text{tg}\delta=9,09$; № 10 – $\text{KЧ}=0,035$, $\text{tg}\delta=2,75$; № 11 – $\text{KЧ}=0,087$, $\text{tg}\delta=7,09$; № 12 – $\text{KЧ}=0,034$, $\text{tg}\delta=3,5$; № 13 – $\text{KЧ}=0,088$, $\text{tg}\delta=7,61$; № 14 – $\text{KЧ}=0,084$, $\text{tg}\delta=5,5$.

Из спектров, приведенных на рис. 5, 6 определили максимум (табл. 1) и построили статистическую зависимость между параметрами образцов масел и максимумами в спектрах свечения. Коэффициент корреляции при нормально распределенных данных обеих выборок и с учетом поправок, обусловленных малым числом наблюдений, ($R=0,90$) получен между положением максимума в спектрах в начале кюветы и $\text{tg}\delta$, а также между положением максимума в спектрах в середине кюветы и кислотным числом (KЧ) ($R=0,88$), что позволяет по спектрам свечения, определять $\text{tg}\delta$ и KЧ исследуемых масел.

Таблица 1 - Положение максимумов спектров свечения образцов

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.7>

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Белый нач ало, λ_{\max}	490	570	520	570	570	490	530	575	590	520	580	510	610	560
Белый середина, λ_{\max}	550	610	575	590	615	510	600	610	610	560	610	510	625	590

Смещение спектров люминесценции ТМ в красную сторону с ростом $\text{tg}\delta$ свидетельствует о росте числа бензольных колец в ароматических соединениях при старении, а смещение максимума в спектре свечения образцов в красную сторону с ростом значений кислотного числа о росте размеров частиц в процессе старения.

В работе [24] «Стандартный метод испытания для измерения мутности в минеральном масле нефтяного происхождения» используется длина волны 600 нм, чтобы исключить влияние молекулярного поглощения на измерение мутности, что полностью согласуется с результатами, полученными в нашей работе.

Заключение

1. Установлено, что спектральные характеристики ТМ в видимой области спектра обусловлены молекулярным поглощением ароматических соединений (область 400-600 нм) и рассеянием света на длинах волн 600-800 нм на непоглощающих в этой области частицах, возникающих в ТМ в процессе окисления.

2. В процессе старения возрастает концентрация ароматических соединений и изменяется структура молекул ароматических соединений, что приводит к возрастанию интенсивности люминесценции трансформаторных масел, а также к изменению спектра свечения масел и смещению их в красную область спектра.

3. В ряду масел ГК, Т-1500, ТКп возрастает концентрация сложных ароматических соединений, что приводит к сдвигу спектров люминесценции в сторону больших длин волн.

4. Выявлена статистическая зависимость положения максимума в спектре люминесценции масла от тангенса угла диэлектрических потерь масла и положения максимума в спектре рассеяния трансформаторного масла от кислотного числа масла, позволяющая определять эти характеристики ТМ спектральным методом.

Конфликт интересов

Не указан.

Conflict of Interest

None declared.

Рецензия

Фазылзянов Р.Р., Научно-производственное объединение «Государственный институт прикладной оптики», Казань, Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.8>

Review

Fazilzyanov R.R., Scientific and Production Association «State Institute of Applied Optics», Kazan, Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.152.56.8>

Список литературы / References

1. Липштейн Р.А. Трансформаторное масло / Р.А. Липштейн Р.А., Шахнович. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 296 с.
2. Martins M. Comparative Study of the Thermaldegradation of Synthetic and Natural Esters and Mineral Oil: Effect of Oil Type in the Thermal Degradation of Insulating Kraft Paper / M. Martins, G. Augusta, A.R. Gomes // IEEE Elec. Insul. Mag. — 2012. — Vol. 28. — № 2. — P. 22–28.
3. Wilson A.C.M. Insulating Liquids: Their Uses, Manufacture and properties / A.C.M. Wilson. — London, 1980. — 221 p.
4. Meshkatoddini M.R. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil / M.R. Meshkatoddini // American Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2008. — Vol.1. — P. 384–388. — DOI: 10.3844/ajeassp.2008.384.388.
5. Saruhashi D. Thermal Degradation Phenomena of Flame Resistance Insulating Paper and Oils / D. Saruhashi, X. Bin, L. Zhiyuan [et al.] // IEEE Trans. Dielec. and Elec. Insul. — 2013. — Vol.20. — № 1. — P. 122–127.
6. Miners K. Particles and Moisture Effect on Dielectric Strength of Transformer Oil Using VDE Electrodes / K. Miners // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. — 1982. — Vol. 101. — № 3. — P. 751–756. — DOI: 10.1109/TPAS.1982.317291.

7. Martins M.A.G. Vegetable Oils an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers-Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil / M.A.G. Martins // IEEE Elect. Insul. Mag. — 2010. — Vol. 26. — № 6. — P. 7–13.
8. Baka N.A. A New Technique to Measure Interfacial Tension of Transformer Oil Using UV-Vis Spectroscopy / N.A. Baka, A. Abu-Siada, S. Islam [et al.] // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. — 2015. — Vol. 22. — № 2. — P. 1275–1282.
9. Fofana I. On the Frequency Domain Dielectric Response of Oil-Paper Insulation at Low Temperatures / I. Fofana, H. Hemmatjou, F. Meghnefi [et al.] // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. — 2010. — Vol. 17. — P. 805–813.
10. ГОСТ 2477-65. Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. — Москва: Стандартинформ публ., 2004. — 6 с.
11. РД 34.43.105-89 Методические указания по эксплуатации трансформаторных масел // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006947> (дата обращения: 28.10.2024).
12. Нурмухаметов Р.Н. Поглощение и люминесценция ароматических соединений / Р.Н. Нурмухаметов. — М.: Химия, 1971. — 216 с.
13. Okabe S. Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data / S. Okabe, G. Ueta, T. Tsuboi // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2013. — Vol. 20. — № 1. — P. 346–355.
14. Dumitran L.M. Method for lifetime estimation of power transformer mineral oil / L.M. Dumitran, R. Setnescu, P.V. Notingher [et al.] // JournalFuel. — London, 2014. — Vol.117. — P. 756–762. — DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.002.
15. Гайнуллина Л.Р. Зависимость диэлектрических характеристик трансформаторного масла от углеводородного состава / Л.Р. Гайнуллина, В.П. Тутубалина, Е.Е. Харлампиди [и др.] // Вестник технологического университета. — 2016. — Т. 19. — № 14. — С. 53–55.
16. Айзстраутс Э.В. Тгδ как показатель качества изоляционных масел / Э.В. Айзстраутс, М.Э. Мункевице // Электрические станции. — 1985. — № 1. — С. 69–72.
17. Майоров А.В. Оценка технического состояния силовых трансформаторов и автотрансформаторов напряжением 110 кВ и выше / А.В. Майоров, М.Ю. Львов, С.А. Кулюхин // Электроэнергия. Передача и распределение. — Москва, 2022. — 128 с.
18. Fofana I. Fundamental investigation on some transformer liquids under various outdoor condition / I. Fofana, H. Borsi, J. Gochenbach // IEEE Trans, on Dielec. and Electric. Insulat. — 2001. — Vol. 8. — № 6. — P. 1040–1047.
19. Abu Bakar N. A novel method of measuring transformer oil interfacial tension using UV-Vis spectroscopy / N. Abu Bakar, A. Abu-Siada // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2016. — Vol. 32. — № 1. — P. 7–13. — DOI: 10.1109/MEI.2016.7361098.
20. Alshehawy A.M. Photoluminescence spectroscopy measurements for effective condition assessment of transformer insulating oil / A.M. Alshehawy, D.E.A. Mansour, M. Ghali [et al.] // Processes. — 2021. — Vol. 9. — № 5.
21. Анисимова Н.А. Идентификация органических соединений / Н.А. Анисимова. — Горно-Алтайск, 2009. — 118 с.
22. Козлов В.К. Определение характеристик качества трансформаторного масла спектральным методом / В.К. Козлов, Д.М. Валиуллина, Р.А. Гиниатуллин // Энергия единой сети. — 2023. — № 5–6 (71). — С. 52–58.
23. Козлов В.К. Механизм деградации трансформаторных масел / В.К. Козлов, Д.М. Валиуллина, О.А. Туранова [и др.] // Электрические станции. — 2022. — № 2 (1087). — С. 41–44.
24. ASTM International. Designation: D 6181-03. Standard Test Method for Measurement of Turbidity in Mineral Insulating Oil of Petroleum Origin. — P. 1–2.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Lipshtejn R.A. Transformatornoe maslo [Transformer oil] / R.A. Lipshtejn R.A., Shahnovich. — М.: Jenergoatomizdat, 1983. — 296 p. [in Russian]
2. Martins M. Comparative Study of the Thermaldegradation of Synthetic and Natural Esters and Mineral Oil: Effect of Oil Type in the Thermal Degradation of Insulating Kraft Paper / M. Martins, G. Augusta, A.R. Gomes // IEEE Elec. Insul. Mag. — 2012. — Vol. 28. — № 2. — P. 22–28.
3. Wilson A.C.M. Insulating Liquids: Their Uses, Manufacture and properties / A.C.M. Wilson. — London, 1980. — 221 p.
4. Meshkatoddini M.R. Aging Study and Lifetime Estimation of Transformer Mineral Oil / M.R. Meshkatoddini // American Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2008. — Vol.1. — P. 384–388. — DOI: 10.3844/ajeassp.2008.384.388.
5. Saruhashi D. Thermal Degradation Phenomena of Flame Resistance Insulating Paper and Oils / D. Saruhashi, X. Bin, L. Zhiyuan [et al.] // IEEE Trans. Dielectr. and Elec. Insul. — 2013. — Vol.20. — № 1. — P. 122–127.
6. Miners K. Particles and Moisture Effect on Dielectric Strength of Transformer Oil Using VDE Electrodes / K. Miners // IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. — 1982. — Vol. 101. — № 3. — P. 751–756. — DOI: 10.1109/TPAS.1982.317291.
7. Martins M.A.G. Vegetable Oils an Alternative to Mineral Oil for Power Transformers-Experimental Study of Paper Aging in Vegetable Oil Versus Mineral Oil / M.A.G. Martins // IEEE Elect. Insul. Mag. — 2010. — Vol. 26. — № 6. — P. 7–13.
8. Baka N.A. A New Technique to Measure Interfacial Tension of Transformer Oil Using UV-Vis Spectroscopy / N.A. Baka, A. Abu-Siada, S. Islam [et al.] // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. — 2015. — Vol. 22. — № 2. — P. 1275–1282.

9. Fofana I. On the Frequency Domain Dielectric Response of Oil-Paper Insulation at Low Temperatures / I. Fofana, H. Hemmatjou, F. Meghnefi [et al.] // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. — 2010. — Vol. 17. — P. 805–813.
10. GOST 2477-65. Neft' i nefteprodukty. Metod opredelenija sodержanija vody [Oil and petroleum products. Method for determination of water content]. — Moscow: Standardinform publ., 2004. — 6 p. [in Russian]
11. RD 34.43.105-89 Metodicheskie ukazaniya po jekspluatacii transformatornyh masel [Methodological guidelines for the operation of transformer oils] // Jelektronnyj fond pravovyh i normativno-tehnicheskikh dokumentov [Electronic collection of legal and normative-technical documents]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200006947> (accessed: 28.10.2024). [in Russian]
12. Nurmuhametov R.N. Pogloshhenie i ljuminescencija aromatičeskikh soedinenij [Absorption and luminescence of aromatic compounds] / R.N. Nurmuhametov. — M.: Himija, 1971. — 216 p. [in Russian]
13. Okabe S. Investigation of aging degradation status of insulating elements in oil-immersed transformer and its diagnostic method based on field measurement data / S. Okabe, G. Ueta, T. Tsuboi // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. — 2013. — Vol. 20. — № 1. — P. 346–355.
14. Dumitran L.M. Method for lifetime estimation of power transformer mineral oil / L.M. Dumitran, R. Setnescu, P.V. Notingher [et al.] // JournalFuel. — London, 2014. — Vol.117. — P. 756–762. — DOI: 10.1016/j.fuel.2013.10.002.
15. Gajnullina L.R. Zavisimost' dijelektričeskikh harakteristik transformatornogo masla ot uglevodorodnogo sostava [Dependence of transformer oil dielectric characteristics on hydrocarbon composition] / L.R. Gajnullina, V.P. Tutubalina, E.E. Harlampidi [et al.] // Vestnik tehnologičeskogo universiteta [Bulletin of Technological University]. — 2016. — Vol. 19. — № 14. — P. 53–55. [in Russian]
16. Ajzstrauts Je.V. Tgδ kak pokazatel' kachestva izoljacionnyh masel [Tgδ as a quality indicator of insulating oils] / Je.V. Ajzstrauts, M.Je. Munkevica // Jelektričeskie stancii [Electric Power Plants]. — 1985. — № 1. — P. 69–72. [in Russian]
17. Majorov A.V. Ocenka tehničeskogo sostojanija silovyh transformatorov i avtotransformatorov naprjazheniem 110 kV i vyshe [Assessment of technical condition of power transformers and autotransformers with voltage of 110 kV and above] / A.V. Majorov, M.Ju. L'vov, S.A. Kuljuhina // Jelektroučenergija. Peredacha i raspredelenie [Electricity. Transmission and distribution]. — Moscow, 2022. — 128 p. [in Russian]
18. Fofana I. Fundamental investigation on some transformer liquids under various outdoor condition / I. Fofana, H. Borsi, J. Gochenbach // IEEE Trans, on Dielec. and Electric. Insulat. — 2001. — Vol. 8. — № 6. — P. 1040–1047.
19. Abu Bakar N. A novel method of measuring transformer oil interfacial tension using UV-Vis spectroscopy / N. Abu Bakar, A. Abu-Siada // IEEE Electrical Insulation Magazine. — 2016. — Vol. 32. — № 1. — P. 7–13. — DOI: 10.1109/MEI.2016.7361098.
20. Alshehawy A.M. Photoluminescence spectroscopy measurements for effective condition assessment of transformer insulating oil / A.M. Alshehawy, D.E.A. Mansour, M. Ghali [et al.] // Processes. — 2021. — Vol. 9. — № 5.
21. Anisimova N.A. Identifikacija organičeskikh soedinenij [Identification of organic compounds] / N.A. Anisimova. — Gorno-Altajsk, 2009. — 118 p. [in Russian]
22. Kozlov V.K. Opredelenie harakteristik kachestva transformatornogo masla spektral'nym metodom [Determination of transformer oil quality characteristics by spectral method] / V.K. Kozlov, D.M. Valiullina, R.A. Giniatullin // Jenergija edinoj seti [Energy of a single grid]. — 2023. — № 5–6 (71). — P. 52–58. [in Russian]
23. Kozlov V.K. Mehanizm degradacii transformatornyh masel [Degradation mechanism of transformer oils] / V.K. Kozlov, D.M. Valiullina, O.A. Turanova [et al.] // Jelektričeskie stancii [Electric Power Plants]. — 2022. — № 2 (1087). — P. 41–44. [in Russian]
24. ASTM International. Designation: D 6181-03. Standard Test Method for Measurement of Turbidity in Mineral Insulating Oil of Petroleum Origin. — P. 1–2.